

과도 안정도를 고려한 총 송전용량 평가

(Assessment of Total Transfer Capability Considering Transient Stability)

박진옥* · 배인수 · 김진오** · 김규호

(Jin-Wook Park · In-Su Bae · Jin-O Kim · Kyu-Ho Kim)

요 약

본 논문은 기존의 총 송전용량 결정에 있어서 고려하기 어려웠던 과도 안정도 제약을 판별법을 적용하기 위해 2 단계 계산 기법을 이용하여 보다 용이하게 적용하였다. 총 송전용량을 계산하기 위한 방법으로 첫 번째 단계에서는 RPF(Repeated Power Flow) 방법을 이용하여 전압과 열적한계를 판별하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 결정된 총 송전용량이 시스템의 과도 안정도 조건의 위반여부를 판별하여 시스템의 총 송전용량을 결정하였다.

Abstract

This paper presents a method to assess total transfer capability(TTC) considering transient stability. TTC is limited not only by the violation of system voltage and thermal limits, but also restricted by transient stability limit, TTC calculation is divided into two processes. The first step is to calculate TTC without considering the transient stability constraint by using repeated power flow(RPF) method. The second step is to perform transient stability analysis based on TTC calculation in the first step.

Key Words : Total Transfer Capability(TTC), Available Transfer Capability(ATC), Transient Stability, Repeated Power Flow(RPF)

1. 서 론

현재 송전 네트워크 운영은 과거의 신뢰도 위주의 운영 방식에서 벗어나 신뢰도 한계 내에서 최고의 효율적 운영을 추구하는 방식으로 변화하게 되었다. 송전용량이란 이러한 환경에서 송전 네트워크와 전

력거래의 효율성을 높이기 위해 사용하기 시작한 개념으로 전력 시스템의 한 지점에서 다른 지점으로 전송할 수 있는 최대 전력을 의미하며, 총 송전용량이란 시스템의 명시된 제약조건과 신뢰도의 위반 없이 상호 연계된 송전 네트워크로 송전할 수 있는 전력의 가장 큰 값을 의미한다. 총 송전용량은 가용 송전용량을 계산하기 위한 중요한 요소이다. 총 송전용량과 가용 송전용량의 관계는 NERC(North American Electric Reliability Council)의 정의로부터 가용 송전용량은 총 송전용량에서 송전 신뢰 여유도와 설비편의 여유용량 및 기존 송전용량의 합을

* 주저자 : 한양대학교 공대 전기공학과
** 교신저자 : 한양대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2005년 8월 5일
1차심사 : 2005년 8월 8일
심사완료 : 2005년 10월 5일

벤 용량이다[1,2,3].

총 송전용량을 결정하기 위한 방법으로 본 논문에서는 RPF방법을 적용한 2단계 계산 기법을 이용하여 전압과 열적한계를 판별하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 결정된 총 송전용량이 시스템의 과도 안정도 조건의 위반여부를 판별하여 시스템의 총 송전용량들 결정하였다[5]. 첫 번째 단계에서 고려한 전압한계는 시스템에서 전압의 변동치가 최고 및 최저 범위 내에서 운영되어야 하고 광범위한 전압 붕괴는 대상 전력 시스템의 일부, 혹은 전 지역의 정전을 초래할 수 있다. 그리고 열적한계는 설비가 과열로 인한 영구 고장이나 안전기준을 초과 하지 않고 주어진 시간 송전선이나 송전설비가 송전할 수 있는 최대 허용 전류의 크기를 결정한다. 두 번째 단계에서 고려한 과도 안정도 한계는 전력 시스템에서 외란이 발생하였을 경우 과도 안정도 기간(약 수 밀리에서 수 분)동안 운영상의 문제가 발생하지 않아야 한다. 연계된 시스템에서 연계된 모든 발전기의 동기는 항상 유지되어야 하며 만일 동기가 깨어질 경우 진동이 발생하여 안정도를 해치게 된다. 만일 새로운 안정점이 확보되지 못 할 경우 동기 상실로 시스템의 일부, 혹은 전체가 불안정하게 되어 광범위한 정전을 발생시킬 수 있다. 이러한 송전에 영향을 주는 모든 요인을 고려하여 시스템의 총 송전용량을 결정한다[1].

2. 본 론

2.1 RPF 방법을 이용한 총 송전용량 결정

총 송전용량을 결정하기 위해 2단계 계산 기법을 적용한 RPF 방법을 이용하였다[5]. RPF 방법은 수요 지역의 부하 모선과 공급지역의 발전기 모선에서 부하와 발전량을 증가시켜 제약 조건이 위반 되지 않을 때까지 전력을 송전함으로써 총 송전용량을 결정할 수 있다[6]. RPF 방법을 이용한 총 송전용량의 수학적 표현은 다음과 같다. 총 송전용량을 계산하기 위해 λ 의 식으로 나타내면

목적함수 : Maximize λ

$$P_{Gi} = P_{G0}(1 + \lambda k_{Gi}) \quad (1)$$

$$P_{Li} = P_{L0}(1 + \lambda k_{Li}) \quad (2)$$

$$Q_{Li} = Q_{L0}(1 + \lambda k_{Li}) \quad (3)$$

여기서

λ : 부하모선과 발전모선에서 전력량 증가를 표현하는 파라미터

P_{G0} : i 모선에서의 초기 발전 유효전력

P_{L0}, Q_{L0} : i 모선에서의 초기 부하 유효·무효전력

k_{Gi}, k_{Li} : participation factor

이때 제약조건은

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j|(G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j|(G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$|V_i|_{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|_{\max} \quad (6)$$

$$|S_{ij}| \leq |S_{ij}|_{\max} \quad (7)$$

$$|\delta_{Gi}(t) - \delta_{Gj}(t)| \leq \delta_{G\max} \quad (8)$$

여기서

P_{Gi}, Q_{Gi} : 모선 i 에서 발전기 유효·무효전력

P_{Li}, Q_{Li} : 모선 i 에서 부하 유효·무효전력

$|V_i|$: 모선 i 에서 전압크기

$|V_i|_{\min}$: 모선 i 에서의 최소 전압크기

$|V_i|_{\max}$: 모선 i 에서의 최대 전압크기

$|S_{ij}|_{\max}$: 선로 ij 에서 정격용량

$\delta_{G\max}$: 최대 swing angle

2.2 과도 안정도 모델

총 송전용량 계산 과정 중, 과도 안정도 제약은 시스템의 상정사고 후에 동적인 상태를 고려해야만 한다. 안정도 평가는 N-1 상정사고 시 발전기 위상각 변화를 관찰하여 수행할 수 있다[7,8].

첫 번째 단계에서 구한 총 송전용량이 시스템에서 안정도 조건을 위반하는가를 판별해만 한다. 과도 안정도는 동요 방정식을 이용하여 판별할 수 있다. 동요 방정식을 식으로 나타내면

과도 안정도를 고려한 총 송전용량 평가

$$\frac{H_i}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta_{Gi}}{dt^2} = P_{mi} - P_{Gi} \quad (9)$$

여기서,

- H_i : 발전기 i 의 관성상수
- δ_{Gi} : 발전기 i 의 회전자 위상각
- P_{mi} : 발전기 i 의 기계적 출력
- P_{Gi} : 발전기 i 의 전기적 출력
- m : 발전기의 수

발전기의 기계적 출력은 시스템 고장 전의 전기적 출력과 같다. 여기서 전기적 출력은 전력 조류 계산 과정에서 구할 수 있고, 전기적 출력의 수학적 표현은 다음과 같다[9].

$$P_{Gi} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_{Gi} + \delta_{Gj}) \quad (10)$$

과도 안정도는 시스템에서 고장이 발생한 후 각 발전기의 위상각 변화를 구함으로써 시스템의 안정도를 판별할 수 있다.

2.3 2단계 계산 기법을 적용한 총 송전용량 결정 방법

RPF 방법은 부하와 발전량을 증가시켜 안전도 조건을 위반하지 않는 범위까지 반복함으로써 상호연계된 지역 사이의 선로에서 총 송전용량을 결정할 수 있다.

그림 1은 2단계 계산 기법을 적용한 RPF 방법으로 총 송전용량을 결정하는 알고리즘을 나타내었다. RPF 방법에서 과도 안정도를 모든 과정에 고려하는 것은 시간이 너무 많이 소요되는 단점이 있다. 그래서 총 송전용량을 결정하기 위해 계산 과정은 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 초기 조류 계산에서 계산된 송전용량을 바탕으로, 전압한계와 열적한계를 위반하지 않을 때까지 λ 를 증가하여 총 송전용량을 결정한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 결정된 총 송전용량을 바탕으로 이 시스템에서 상정사고가 발생한 경우 과도안정도 한계의 위반 여부를 판별한다. 만약 시스템이 과도 안정도를 위반

한다면 시스템이 안정하게 되어질 때까지 λ 를 감소한다. 시스템이 안정도 조건을 위반하지 않았을 때의 값을 이 시스템에서의 총 송전용량을 결정할 수 있다.

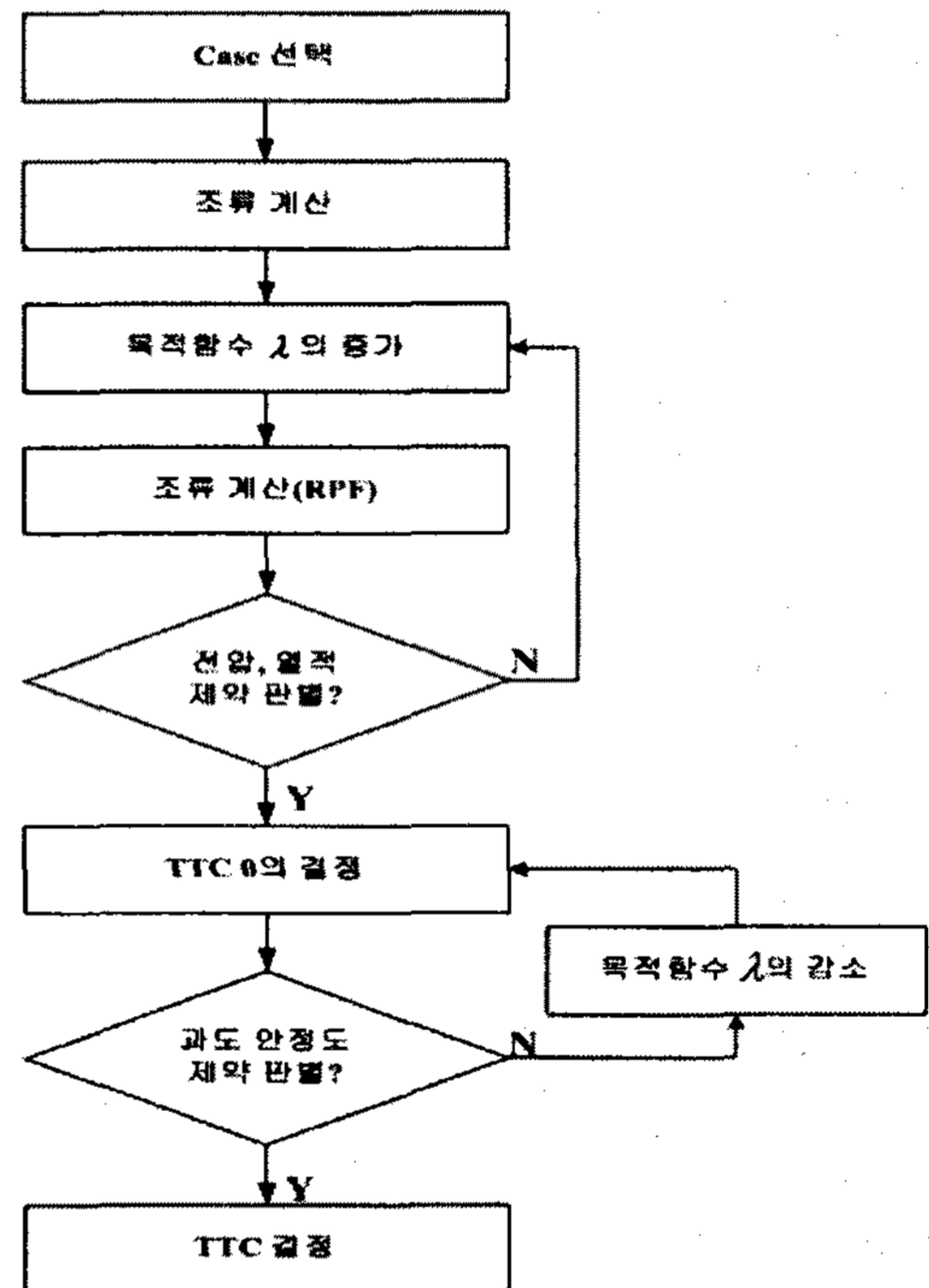


그림 1. RPF방법을 이용한 TTC 결정
Fig. 1. TTC determination using RPF

2.4 사례연구

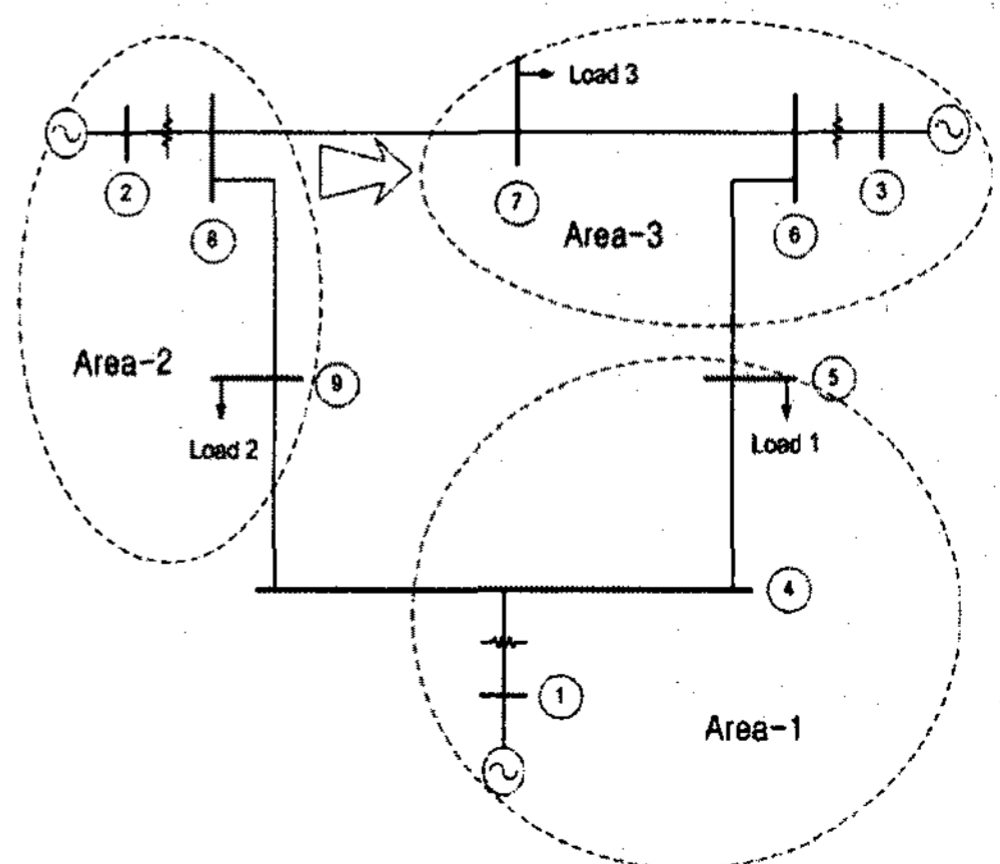


그림 2. WSCC-9 모선 시스템
Fig. 2. WSCC-9 bus system

본 논문에서는 WSCC-9 모선 시스템을 사용하여 총 송전용량 결정에 이용하였다. 시스템을 세 개의 지역으로 가정하였고, 연계선로에서의 명시된 제약 조건과 신뢰도 위반이 없을 때 총 송전용량을 결정하였다.

각 모선에서의 전압한계는 $0.90 \leq V \leq 1.10$ 로서 동일하게 적용하였고, 표 1은 각 송전선로의 열적한계를 나타내었다.

표 1. 선로의 열용량 한계
Table 1. Transmission line thermal limit

선로	4-5	4-9	5-6	6-7	7-8	8-9
용량 (MVA)	135	140	140	145	150	150

지역 2를 공급지역, 지역 3을 수요지역으로 가정하여, RPF 방법을 적용한 첫 번째 단계에서의 전압과 열적한계를 고려하여 결정한 송전용량을 표 2에 나타내었다.

표 2. 첫 번째 단계에서 결정된 총 송전용량
Table 2. TTC level in first step

Case	TTC level([MW])
기준 상태	148.14
선로 4-5 고장	149.42
선로 4-9 고장	148.65
선로 5-6 고장	143.19
선로 6-7 고장	139.53
선로 8-9 고장	164.63

과도 안정도를 고려하지 않은 위 결과는 최적의 송전용량이라 할 수 있겠다. 하지만 전력 시스템의 운영이 불확실하기 때문에 위 결과를 실제 시스템에 적용하기란 어렵다. 그래서 전력 시스템의 상정사고뿐만 아니라 발전과 부하의 변화에 대한 불확실성에 대비한 과도 안정도 평가 과정이 필요하다.

만약 송전선로에서 상정사고나 외란이 발생하였을 경우, 두 번째 단계에서 과도 안정도 한계의 위반 여부를 수행한다. 이 때 시스템의 안정도를 위반하였다면, 위반 하지 않을 때까지 λ 를 감소하여 총 송전용량을 결정한다.

기준 상태 경우는 시스템에 어떠한 상정사고나 외란이 발생하지 않은 경우이다. 이 때 총 송전용량 수준은 148.14[MW]로 결정할 수 있다.

선로 4-5에서 고장이 발생한 경우, 지역 2에서 지역 3으로의 송전할 수 있는 용량은 전압과 열적한계만을 고려했을 경우 149.42[MW]이다. 그리고 그림 3과 같이 안정도 평가 결과, 고장 후에도 시스템은 안정한 것을 볼 수 있다. 이 경우는 선로 고장이 시스템의 안정도에 큰 영향을 미치지 못하는 경우이다. 이 경우의 송전용량 수준은 과도 안정도 제약을 고려하지 않은 경우 보다 약간 감소한 148.14[MW]에서 결정된다.

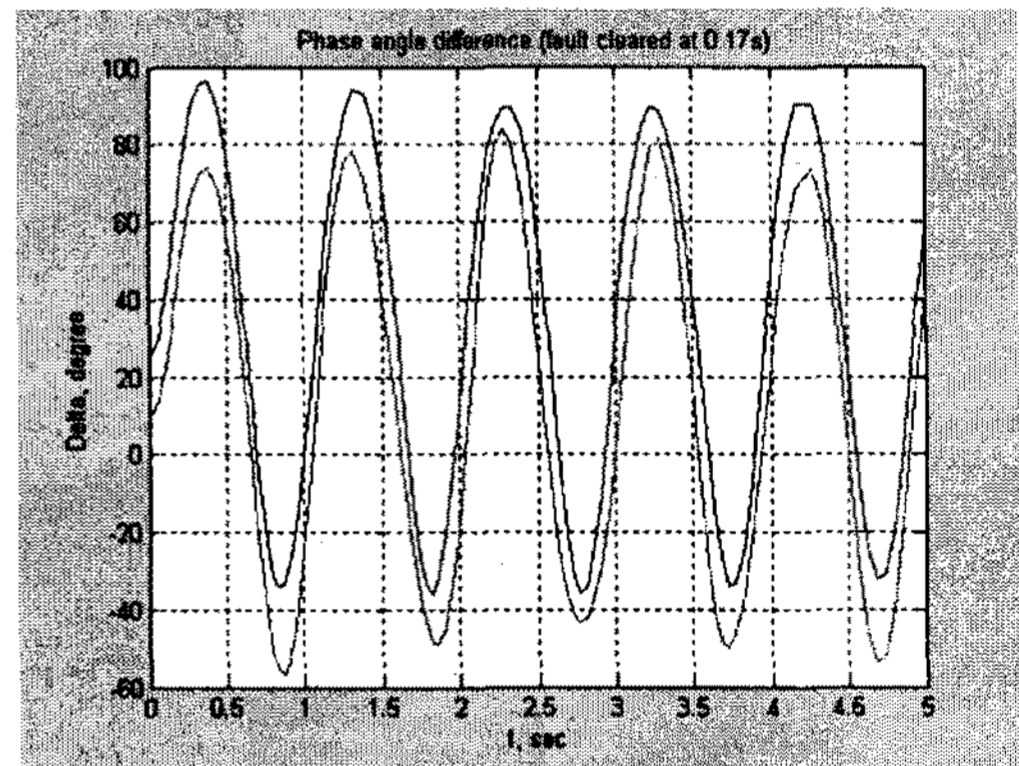


그림 3. 선로 4-5 고상 후 안정도 판별
Fig. 3. Stability evaluation after line 4-5 fault

선로 4-9에서 고장이 발생하였을 경우, 연계선로의 총 송전용량은 선로 4-5의 고장 경우와 비슷하다. 이 경우의 총 송전용량 수준은 148.14[MW]에서 결정된다.

반면에 선로 5-6에서 고장이 발생하였을 경우, 전압과 열적한계만을 고려한 송전용량 143.19[MW]의 경우에는 그림 4처럼 시스템이 안정도 조건을 위반하는 것을 알 수 있다. 그래서 시스템의 안정도 조건을 위반하지 않을 때까지 λ 를 감소하여 총 송전용량을 결정하는 두 번째 단계 필요하다. 그림 5는 λ 를 감소하여 시스템 상태가 안정되어진 것을 보여주고, 이 때 송전용량은 136.78[MW]까지 감소되어진다. 이 값을 선로 5-6 고장시의 총 송전용량 수준으로 결정할 수 있다. 이 결과의 의미는 기존의 전압과 열적한계만을 고려하여 결정한 총 송전용량이 시스템

과도 안정도를 고려한 총 송전용량 평가

에 상정사고가 발생하였을 경우, 시스템은 불안정하게 되어지고 결국, 광범위한 사고로 이어질 수도 있다는 것을 증명한다.

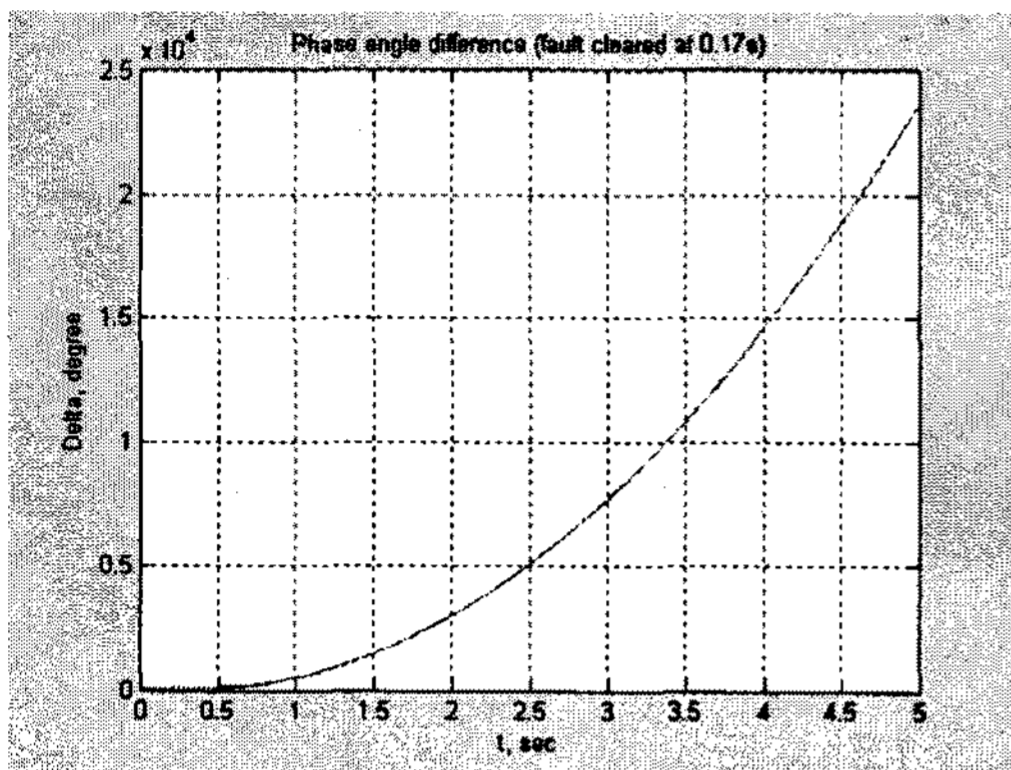


그림 4. 선로 5-6 고장 후 안정도 판별
Fig. 4. Stability evaluation after line 5-6 fault

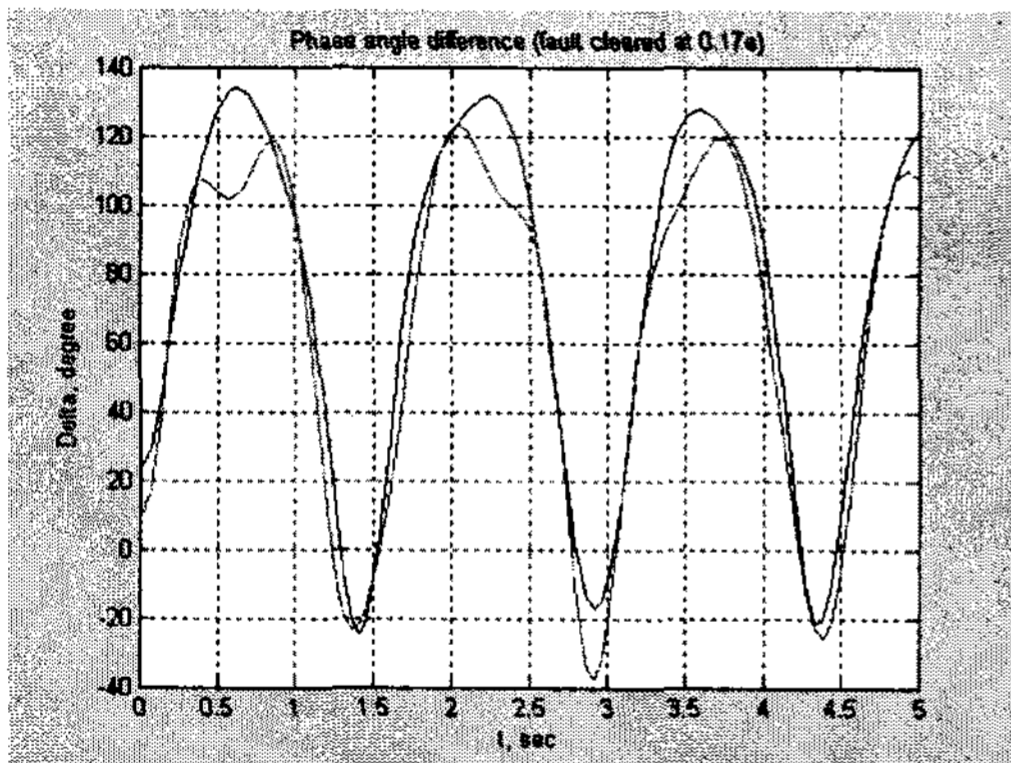


그림 5. λ 감소 후 시스템 안정도 평가
Fig. 5. System stability after decreasing λ

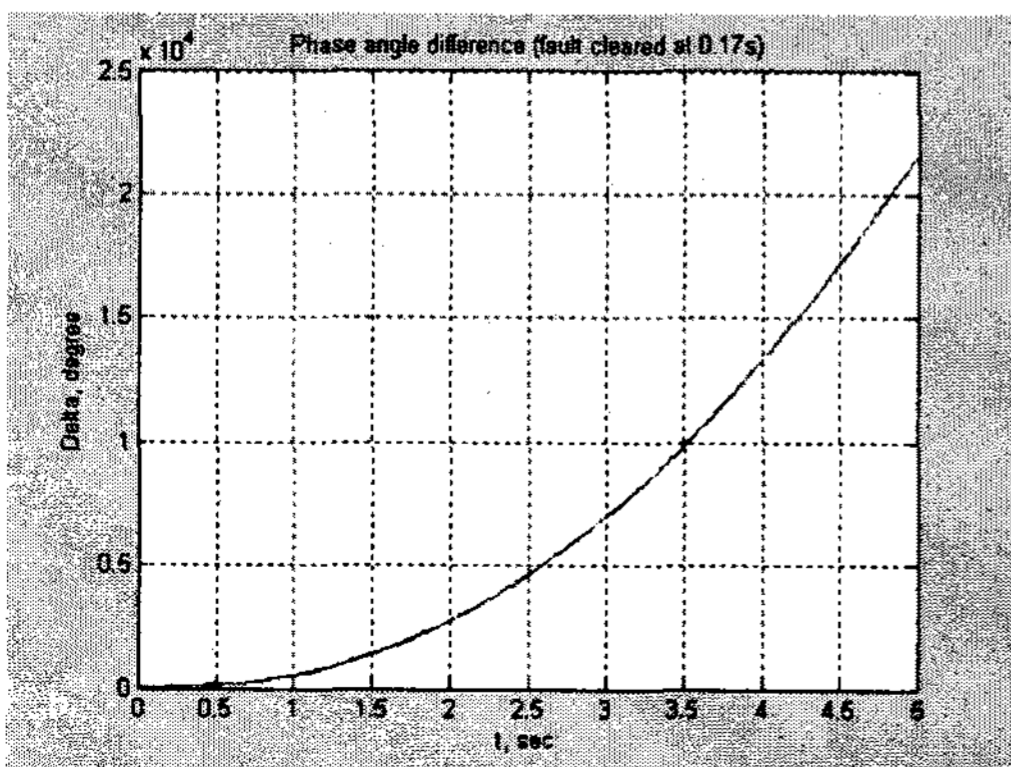


그림 6. 선로 8-9에서 고장 발생 후 안정도 평가
Fig. 6. Stability evaluation after line 8-9 fault

선로 8-9에서 고장이 발생하였을 경우, 전압과 열적 한계만을 고려했을 때의 지역 2에서 지역 3으로의 송전용량은 164.63[MW]이다. 하지만 그림 6과 같이 안정도 평가 결과는 불안정하다. 이 경우도 위와 같은 방법으로 시스템의 안정도 조건을 만족할 때까지 λ 를 감소하여 총 송전용량을 결정한다. 그림 7은 시스템 상태를 조정 λ 를 감소하여 시스템이 안정하다는 것을 보여주고, 이 경우의 총 송전용량의 수준은 100.22[MW]까지 감소한다.

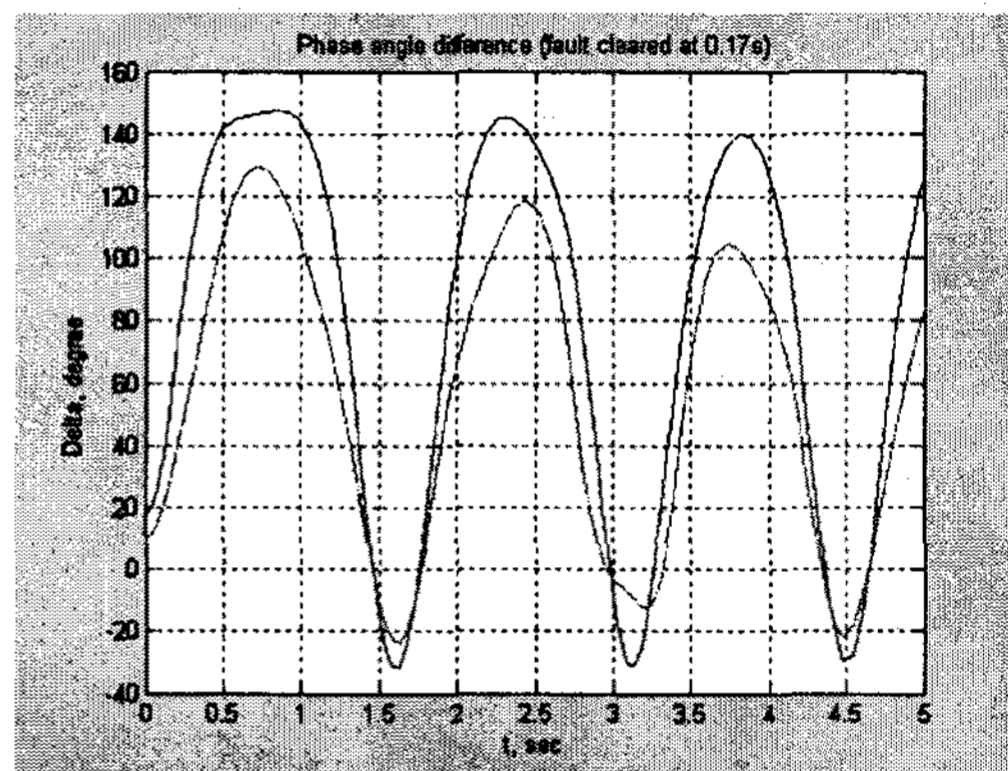


그림 7. 선로 8-9에서 고장 발생 후 시스템 안정도 평가(λ 감소 시)
Fig. 7. System stability after decreasing λ in line 8-9 fault

다른 경우도 위와 동일한 방법으로 결정할 수 있다. 본 논문에서는 계산 과정을 단순히 하기위해 제어 부분과 급격한 부하 변동에 대해서는 무시하고 송전선로의 고장에 대한 불확실성만을 고려하였다.

표 3. 과도 안정도를 고려한 총 송전용량
Table 3. TTC level considering transient stability

Case	TTC level([MW])
base case	148.14
선로 4-5 고장	148.14
선로 4-9 고장	148.14
선로 5-6 고장	136.78
선로 6-7 고장	145.61
선로 8-9 고장	100.22

모든 선로 고장에 대한 결과를 표 3에 나타내었다.

선로 8-9에서 고장이 발생한 경우, 가장 작은 100.22[MW]의 송전용량 수준이 이 시스템에서의 과도 안정도를 고려한 총 송전용량으로 결정된다. 이것은 과도 안정도 조건을 고려하지 않았을 경우 보다 낮은 용량을 보이지만, 전력 시스템의 상정사고 또는 외란 등의 불확실성에 대비하여야 하기 때문에 실제 시스템에서 과도 안정도 조건을 고려한 총 송전용량 평가를 해야 하는 이유이다.

3. 결 론

본 논문에서는 가용 송전용량의 중요한 구성요소인 총 송전용량을 결정하였다. 기존의 총 송전용량 결정에 있어서 고려하기 어려웠던 과도 안정도 제약을 2 단계 계산 기법을 이용하여 보다 용이하게 적용하여 시스템에서 보다 정확한 총 송전용량을 결정하였다. 전압한계와 열적한계만을 고려했던 기존의 방법에 추가적으로 시스템의 상정사고가 발생 후 과도 안정도 판별까지 하였을 경우 총 송전 용량이 감소됨을 보였다. 이것은 안정도 제약이 총 송전용량 산정에 꼭 필요한 요소이고 실제 시스템 운영에서 경제적, 효율적인 운영을 위해서 필요할 것이다.

향후 연구로는 결정된 총 송전용량을 바탕으로 송전 신뢰 여유도와 설비편의 여유도를 결정하여 가용 송전용량에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

이 논문은 2003년도 한국과학재단의 지원으로 수행되었음. (F01-2003-000-00073-0)

References

[1] North American Electric Reliability Council, (NERC), "Available Transfer Capacity-Definitions and Determination", NERC Report, June 1996.
 [2] Transmission Transfer Capacity Task force, "Total tra-nsfer Capability", North Amer. Elect. Council.

Princeton, NJ, May 1995.
 [3] North American Electric Reliability Council (NERC), "Transmission Capability Margin and Their Use in ATC Determination", NERC White Paper, 1999.
 [4] K. Audomvongseeree, and A. Yakoyama, "Consideration of an Appropriate TTC by Probabilistic Approach", IEEE Trans. Power system, vol. 19, No. 1, Feb 2004.
 [5] X. Yu, C. Singh, "Probabilistic Analysis of Total Transfer Capability Considering Security Constraints", 8th International Conference on PMAFS, Ames, Iowa, sept, 12-16, 2004.
 [6] Y. Ou, C. Shing, "Assessment of Available Transfer Capability and Margins", Power Systems, IEEE Transactions, Vol. 17, Issue 2, May 2002, pp. 463-468.
 [7] P. A Anderson, A. A Fouad, "Power System Control and Stability". IEEE press, 1994.
 [8] J. Machowski, J. Bialek, J. Burbt, "Power System Dynamics Stability". John Wiley & Sons, England, 1997.
 [9] G. M. Huang, Y. Li, "Power System Reliability Indices to Measure Impacts Caused by Transient Stability Crises", Power Engineering Society Winter Meeting 2002, IEEE, Vol.2, 27-31 Jan. 2002, pp. 766-771, vol. 2.

◇ 저자소개 ◇

박진욱 (朴鎭旭)

1977년 12월 10일생. 2001년 2월 세명대학교 전기공학과 졸업. 2004년 2월 한양대 대학원 전기공학과 입학. 2004년~현재 동대학원 전기공학과 석사과정.

배인수 (裵引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

김진오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전자전기공학부 교수.

김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 안산공과대학 전기과 부교수.